

Michel Tissot

Le guide de

l'énergie solaire et photovoltaïque

© Groupe Eyrolles, 2008,

ISBN 978-2-212-12332-6

EYROLLES



1 > Le solaire : l'énergie des étoiles

Le soleil a été dans de nombreuses civilisations anciennes, adoré comme un dieu, source de toute vie. De fait, la lumière du soleil, transformée par les plantes, est l'énergie qui nous nourrit et qui circule dans l'ensemble de l'écosystème terrestre.

Dans la galaxie, notre soleil est une étoile bien banale, de taille modeste comme il en existe des millions. À l'échelle humaine, cette fournaise thermonucléaire est pourtant gigantesque : un million de fois le volume de la terre, une température de 15 millions de degrés en son centre. D'où vient cette énergie ?

Le moteur des étoiles est la fusion nucléaire. Il y a 5 milliards d'année notre soleil a commencé son histoire comme toutes les étoiles, par la condensation gravitationnelle d'un nuage de poussières et de gaz. L'hydrogène était alors le principal constituant de notre étoile en formation. Progressivement écrasé par la gigantesque pression régnant au centre de cette énorme boule de gaz, l'hydrogène s'est échauffé, jusqu'à des températures où les réactions de fusion nucléaire sont possibles. En fusionnant, quatre atomes d'hydrogène se transforment en un nouvel élément : l'hélium. Les atomes d'hélium sont une fraction

Maîtrise de l'énergie...

La maîtrise de l'énergie a toujours été une préoccupation humaine depuis l'invention du feu, il y a plus de 400 000 ans. Énergie de cuisson des aliments d'abord, de chauffage lorsque la colonisation des régions tempérées a commencé, puis énergie pour l'agriculture, les transports, la transformation de la matière : nos besoins en énergie n'ont jamais cessé d'augmenter. Or, presque toutes les sources d'énergie que l'homme a utilisées, du bois au pétrole, ont eu pour origine la lumière solaire.

de fois plus légers que l'hydrogène dont ils proviennent. Cette masse manquante a été transformée en énergie suivant la célèbre formule d'Einstein $E = mc^2$. Le soleil s'est allumé.

Depuis, à chaque seconde, le soleil convertit 600 millions de tonnes d'hydrogène en hélium, produisant un flux d'énergie qui pourrait couvrir les besoins de l'humanité pour plusieurs milliers d'années. Le rayonnement produit est d'une telle puissance qu'il serait mortel pour toute vie qui s'y exposerait directement.

Heureusement, à 150 millions de kilomètres de là, la terre ne reçoit qu'une fraction infime de ce rayonnement. Placée à une distance idéale du soleil et protégée par son atmosphère, notre planète peut maintenir son climat dans des limites compatibles avec la vie.

Un peu de physique¹

Le flux d'énergie solaire qui atteint le sol terrestre est de 1000 W/m^2 , mais différents facteurs vont rendre la répartition de l'énergie solaire très inégale à la surface de la terre : ainsi, les régions tropicales et les déserts reçoivent globalement plus d'énergie que les pôles.

La première cause de cette inégalité de répartition est liée à la rotondité de la surface terrestre. Dans les régions proches de l'équateur, le soleil éclaire la surface terrestre presque perpendiculairement, ce qui a deux conséquences. Tout d'abord chaque mètre carré de surface au sol intercepte pratiquement la totalité du flux solaire. Ensuite, l'épaisseur de l'atmosphère que doit traverser la lumière solaire pour arriver au sol est très faible².

Dans les régions polaires, les conditions d'éclairement sont beaucoup moins favorables : la lumière solaire arrive suivant un angle rasant par rapport à la surface : la même quantité d'énergie se répartit sur une plus grande surface. C'est pourquoi le rayonnement solaire reçu par unité de surface diminue de l'équateur vers les pôles. De plus, la lumière doit faire un plus grand trajet à travers l'atmosphère dans les régions polaires, ce qui contribue encore à diminuer l'intensité du rayonnement qui arrive au niveau du sol.

Ce déséquilibre fondamental de la répartition de l'énergie à la surface de la terre est le moteur qui anime la gigantesque machinerie climatique de la planète. Tous les mouvements du climat : les dépressions, les orages, les alizés, les courants marins, ne sont que la tentative

1. Les lecteurs fâchés avec les sciences peuvent sans scrupule passer directement au chapitre 2, où commencent les travaux pratiques !

2. La lumière solaire perdra néanmoins près des trois quarts de son intensité en traversant la centaine de kilomètres de l'atmosphère terrestre.

perpétuelle de l'atmosphère et des océans pour essayer de rééquilibrer le déficit de chaleur des régions polaires.

Les nuages, qui sont une des conséquences de ces mouvements de l'atmosphère, vont être la seconde cause d'inégalité du rayonnement solaire à la surface de la Terre. En interceptant régulièrement la quasi-totalité du rayonnement dans certaines régions, ils vont encore réduire la durée d'ensoleillement annuelle.

Il en résulte que l'énergie solaire exploitable peut varier d'un facteur 10 suivant l'endroit de la planète considéré. On peut espérer en moyenne 350 W/m^2 dans le désert du Ténéré, et à peine 50 W/m^2 dans la péninsule antarctique.

L'ensoleillement en France < 2

La France métropolitaine se situe en zone tempérée, dans un régime intermédiaire entre les régions hyper ensoleillées d'Afrique du nord, et les régions sous ensoleillées des pays nordiques. Théoriquement, chaque mètre carré en France reçoit suffisamment d'énergie pour faire fonctionner entre 5 et 10 ampoules. N'importe quelle toiture de maison reçoit plus d'énergie du soleil que n'en consommeront ses habitants.

Comment mesure-t-on l'énergie solaire ?

L'unité de mesure adoptée pour quantifier la ressource solaire journalière est le kWh/m²/jour (kilowattheure/mètre carré/jour).

Un mètre carré bien orienté, éclairé en plein soleil, reçoit en France une puissance maximale de 1000 W (ce qui correspondrait à la consommation électrique de 10 ampoules à incandescence, ou à 50 lampes écotone). En une heure, ce mètre carré va pouvoir accumuler 1 kWh d'énergie. Mais l'éclairage optimal ne dure pas toute la journée : il peut être occulté par les nuages, il est mal orienté le matin ou le soir. Sur l'ensemble de la journée on ne disposera que de quelque 5 kWh/m²/jour en Provence en plein été, et à peine 700 Wh/m²/jour en décembre à Strasbourg¹.

Il faut donc bien distinguer la puissance maximale de l'énergie solaire (à midi en plein été) et l'énergie obtenue en une journée moyenne.

¹. Ces chiffres sont donnés pour une surface horizontale. Lorsqu'on oriente un panneau avec une bonne inclinaison, on intercepte un flux solaire plus important. Nous verrons comment on détermine l'inclinaison optimale des panneaux à la page 42

Les écarts d'ensoleillement sur le territoire français ne sont pas tant dus aux variations de latitudes qu'aux conditions climatiques. Du nord au sud, la latitude (qui détermine l'angle sous lequel le soleil va éclairer le sol) varie peu (entre 50° à Lille et 42° à Perpignan). En revanche, le nombre d'heures d'ensoleillement est très inégalement réparti sur le territoire, à cause des conditions météorologiques. Les régions du sud sont bien sûr les plus favorisées : le maximum d'ensoleillement est observé sur la Côte d'Azur. L'ensoleillement diminue ensuite graduellement vers le nord, avec quelques régions privilégiées comme la Vallée du Rhône et le sud ouest.

Cet écart entre le nord et le sud est plus ou moins marqué selon les saisons, comme le montrent les cartes d'ensoleillement département par département (fig. 2.1 et 2.2).

L'ensoleillement de chaque localité étant un cas particulier, la commission européenne a édité un atlas interactif de l'énergie solaire¹. Vous y trouverez des informations très détaillées sur l'ensoleillement de chaque localité d'Europe, et de la simulation de fonctionnement de systèmes solaire, heure par heure et mois par mois.

1. Qui est consultable sur Internet : <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis>

Fig. 2.1 – Ensoleillement en France métropolitaine en été

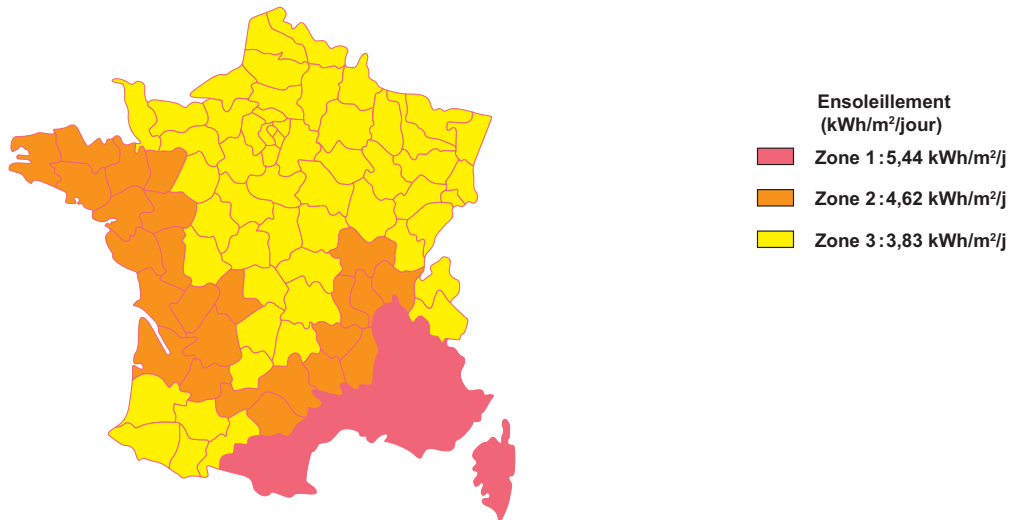
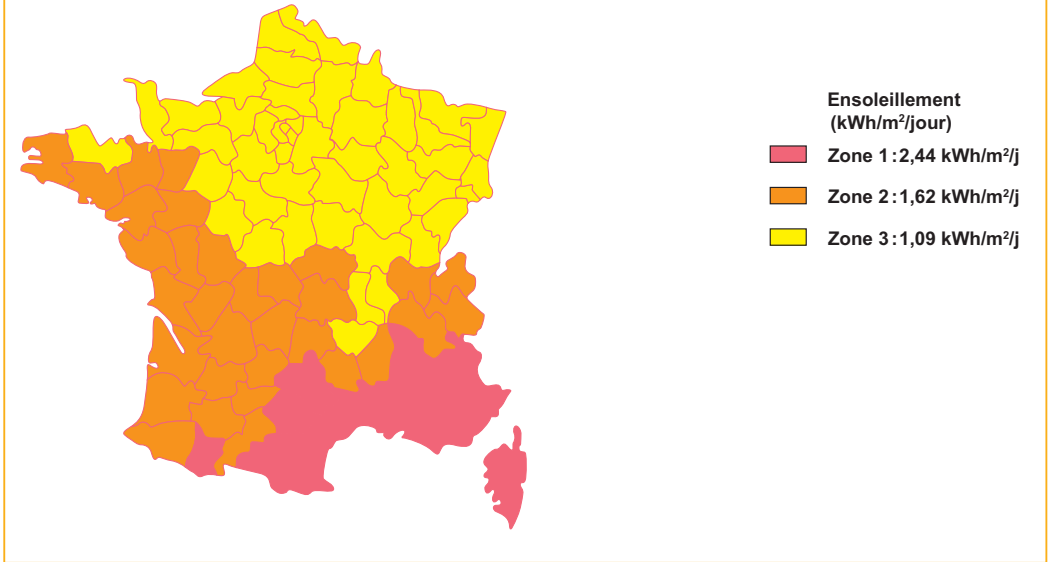


Fig. 2.2 – Ensoleillement en hiver



Le solaire fonctionne-t-il vraiment mieux au sud ?

Il faut relativiser la différence d'ensoleillement entre le nord et le sud du pays. Il est évident que ces variations d'ensoleillement vont être primordiales dans le calcul des surfaces de capteurs à mettre en place pour un projet. Néanmoins, il ne faut pas conclure qu'une installation solaire n'est rentable qu'au sud.

L'Allemagne, qui se situe dans des conditions bien plus défavorables que le nord de la France, est le pays leader du solaire en Europe. L'Alsace a été une des régions où le développement des chauffe-eau solaires a été le plus rapide.

En fait, un ensoleillement réduit oblige à augmenter la surface de capteurs solaires pour obtenir des performances données. Or le prix des capteurs n'est qu'une partie du coût d'un projet solaire, et son augmentation ne se répercute pas forcément linéairement sur le montant de l'investissement.

On peut même avoir des surprises sur la rentabilité des projets. Ainsi, une installation de chauffage par plancher solaire direct, sera curieusement plus rentable en Alsace qu'en Provence, malgré des investissements plus importants en capteurs. La raison ? Les besoins de chauffage sont plus importants durant l'hiver, et s'étalent sur plus de mois dans l'année en Alsace. Les économies de chauffage réalisées grâce à l'installation solaire seront finalement plus importantes dans le nord-est, et permettront de rentabiliser l'installation plus vite que dans le climat clément du sud.

Et dans les départements d'Outre-Mer ?

Les départements d'Outre-Mer sont connus pour leur ensoleillement puissant tout au long de l'année. Dans les Antilles et en Guyane, l'ensoleillement est relativement constant et homogène durant l'année, variant entre 5 et 6 kWh/m²/j en Martinique et entre 4 et 5 en Guyane. À la réunion, l'ensoleillement varie plus fortement entre 7 kWh/j/m² en janvier et 4 kWh/j/m² en juillet.

Comment capter l'énergie solaire ?

3

Comment fait-on pour capter l'énergie solaire ? La réponse diffère suivant que l'on souhaite produire de la chaleur ou de l'électricité. On distingue les toits bleus (photovoltaïques) des toits noirs (solaire thermique).

En effet, les deux technologies solaires, thermiques et photovoltaïques font appel à des approches techniques totalement différentes. Ce sont deux filières d'énergie renouvelable distinctes, faisant appel à des compétences et des matériels différents.

Récupérer la chaleur du soleil

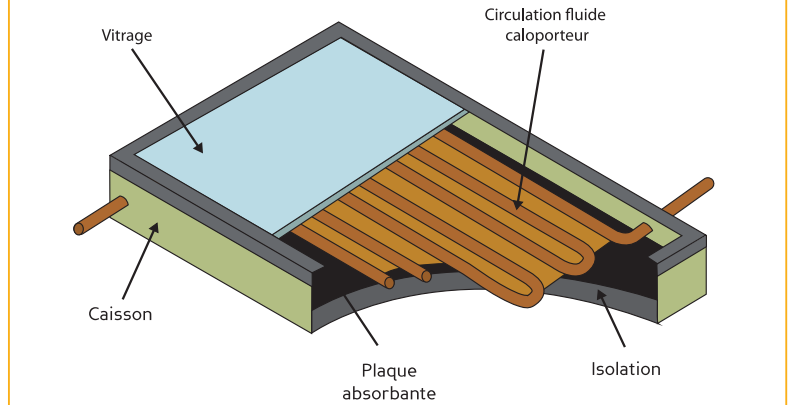
Chacun en a fait l'expérience en été : un simple tuyau d'arrosage laissé au soleil va fournir quelques litres d'eau chaude lorsqu'on le videra. Comment améliorer ce système ?

Une première amélioration consistera à peindre le tuyau en noir. En effet, un corps coloré réfléchit une partie de la lumière qui l'éclaire. C'est autant d'énergie qui ne sera pas absorbée. Un corps noir ne réfléchit pratiquement aucune lumière, et absorbe donc la plupart de l'énergie pour la transformer en chaleur. Le problème, c'est que cette chaleur accumulée va néanmoins rayonner dans l'infrarouge vers l'extérieur du tuyau. Comment retenir cette énergie ? C'est le rôle du vitrage.

Un vitrage ordinaire est opaque au rayonnement infrarouge et va permettre de conserver ce rayonnement thermique dans l'enceinte du capteur, tout en laissant entrer la lumière visible du soleil.

Sur l'arrière du capteur qui n'a pas besoin d'être transparent, une isolation (avec des isolants conventionnels) permet de conserver la chaleur.

Fig. 3.1 – Schéma d'un capteur solaire



Une fois que le rayonnement solaire a été transformé en chaleur, il faut amener cette énergie-là où elle doit être stockée. C'est le rôle du fluide caloporteur qui circule dans le panneau. Froid à l'entrée du circuit, il se réchauffe progressivement dans le panneau, et à la sortie du capteur, il permet d'évacuer la chaleur vers là où elle doit être consommée.

Résumons-nous

Pour capter l'énergie solaire thermique, il faut d'abord l'absorber (corps noir), la conserver (vitre et isolant), et l'évacuer au bon endroit (fluide caloporteur).

Transformer la lumière en électricité

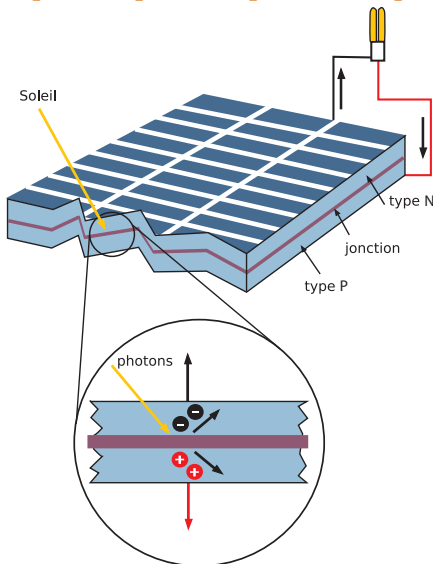
Il existe une autre manière de capter l'énergie du rayonnement solaire : c'est la filière photovoltaïque, qui transforme directement la lumière en électricité.

Le matériau destiné à fabriquer les cellules photovoltaïques est le silicium qui est identique à celui utilisé par l'industrie informatique. C'est

un des éléments les plus abondants dans la croûte terrestre : c'est par exemple le constituant principal du sable. Le silicium naturel n'est pas utilisable directement, car c'est un isolant électrique. Pour développer l'effet photo électrique il faudra le rendre semi-conducteur. Pour cela, il faut d'abord obtenir du silicium pur, débarrassé de ses impuretés. Ce silicium n'est toujours pas conducteur en lui-même, mais on peut le « doper » c'est-à-dire ajouter quelques atomes de phosphore et de bore qui vont changer les propriétés de ce cristal. La partie « dopée » au phosphore devient du silicium « de type N » avec un excès d'électrons et la partie dopée au bore est de « type P » avec un manque d'électron par rapport à la structure cristalline. Ce manque d'électrons dans le silicium de type P peut s'interpréter comme un ensemble de trous prêts à recevoir des électrons.

La jonction des deux types de silicium P et N donne un semi-conducteur, c'est-à-dire un matériau dans lequel le courant ne pourra passer que dans un seul sens. Pourquoi ? De manière simplifiée, disons que les électrons en excès de la partie N peuvent franchir la jonction pour aller remplir les « trous » de la partie P. En revanche il est impossible de faire passer les « trous » de la partie P à travers la jonction. Une jonction P.N. permet le passage d'un courant quand celui-ci parcourt le semi-conducteur dans le sens du cristal dopé P vers celui dopé P

Fig. 3.2 – Principe d'un panneau photovoltaïque



N. Elle s'oppose à la circulation d'un courant dans le sens inverse. Le mouvement d'électrons, qui est à l'origine du courant électrique ne peut se faire que dans un sens.

Que se passe-t-il quand on expose un semi-conducteur à la lumière ? Les particules de lumière, les photons, éjectent des électrons de leurs orbitales atomiques. Ces électrons se retrouvent bloqués par la jonction. L'accumulation d'électrons crée un courant proportionnel au flux lumineux. Les électrodes placées de part et d'autre de la photopile permettent de collecter ce courant électrique.

High-tech mais robuste, propre et sans entretien, la technologie photovoltaïque est séduisante à plus d'un titre. Son seul souci : le prix de fabrication des éléments photovoltaïques reste encore élevé. Si le soleil est bien gratuit, le coût des panneaux solaires rend le kilowattheure solaire bien plus cher que les autres méthodes de production d'électricité qui existent à l'heure actuelle.

Les usages du soleil

Réservés à des usages spécifiques, le solaire thermique et le photovoltaïque sont bien adaptés aux usages domestiques. Ce sont en effet des sources d'énergies disponibles partout, décentralisées et qui ne nécessitent pas de gros investissements.

Elles ont néanmoins des contraintes qu'il faut bien prendre en compte pour les adapter aux usages domestiques.

Le faible rendement et les coûts de fabrication importants des panneaux photovoltaïques rendent l'énergie électrique solaire chère. Il convient donc de ne l'utiliser que pour des usages où le courant ne sera pas gaspillé. Il serait complètement inefficace de vouloir faire un chauffage électrique branché sur un panneau photovoltaïque. De simples techniques architecturales (comme celles évoquées p. 69 et suivantes) seront bien plus efficaces (et moins chères) pour chauffer un logement avec le soleil. On réservera donc les solutions photovoltaïques domestiques aux cas où le courant électrique produit sera parfaitement valorisé :

- Électrification en site isolé non raccordé au réseau (le coût d'un raccordement sera souvent supérieur à celui d'une installation photovoltaïque).
- Rachat d'électricité solaire à un tarif préférentiel (l'électricité solaire se négocie jusqu'à 0,55 €/kWh, contre 0,10 €/kWh pour un abonnement classique).

Le solaire thermique souffre de deux contraintes totalement différentes. Tout d'abord c'est une source d'énergie de faible puissance instantanée : il n'est pas possible d'obtenir de l'eau chaude solaire à la demande comme avec un chauffe-eau à gaz, et il faudra donc prévoir de stocker la chaleur produite. Ensuite, c'est une source de chaleur à basse température. En effet, plus la différence de température entre l'air extérieur et l'intérieur d'un panneau solaire augmente, plus les pertes thermiques sont importantes. Difficile dans ces conditions de produire en continu de l'eau très chaude comme celle d'un chauffage central. Néanmoins, les basses températures sont tout à fait adaptées à la production d'eau chaude sanitaire et au chauffage par plancher chauffant.

La première application évidente du solaire reste l'eau chaude sanitaire. Facile à mettre en œuvre avec un investissement et des travaux modérés, disposant de tout un panel d'aides financières très intéressantes, adapté à l'habitat individuel et collectif, dans l'ancien comme dans le neuf, c'est une solution simple qui permet de couvrir près de 70 % des besoins en eau chaude d'un logement. Nous allons décrire dans le chapitre 8 (p. 50), comment mettre en œuvre un projet de chauffe-eau solaire.

Lorsqu'on a commencé à faire entrer l'énergie du soleil dans la maison, il est tentant de prolonger la démarche. Le chauffage solaire permet à de nombreux logements en France de réduire considérablement leurs besoins de chauffage, voire, pour les maisons passives, de s'en passer totalement. Cela vous paraît utopique ? Venez donc jeter un coup d'œil à la p. 70 où nous avons rassemblé quelques innovations de l'architecture bioclimatique.

L'électrification solaire représente des projets d'investissement plus importants que le solaire thermique. Mais les prix d'achat actuels de l'électricité solaire, et les aides financières consenties pour aider au développement de cette filière énergétique font que ce type de projet est rentable. Enfin, nous considérerons comment mettre en place chez soi un toit photovoltaïque.